

文章编号: 0258-7025(2003)09-0839-04

# 彩色三维激光扫描系统结构参数的优化设计

许智钦, 孙长库\*, 郑义忠

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 介绍了彩色三维激光扫描测量系统的工作原理,推导出空间三维坐标的光平面方程测量模型。提出了系统结构参数的优化设计方法,进行了优化实验,根据实验结果,确定了测量系统的最佳参数值。基于这些参数建造的测量系统,在 250 mm×200 mm×50 mm 测量范围内,测量误差小于 0.1 mm。

**关键词** 信息光学;三维测量;激光扫描;光平面方程式;结构参数;优化设计

**中图分类号** TN 911.73 **文献标识码** A

## Structure Parameters' Optimization Design of the Color 3D Laser Scanning Measurement System

XU Zhi-qin, SUN Chang-ku, ZHENG Yi-zhong

(State Key Lab. of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** This paper introduces the principle of the color 3D laser scanning measurement. The light-plane-equation mathematical model of spatial 3D coordinates is derived. Optimum design for structure parameters of the measuring system is presented, experiments on the optimization of structure parameters were performed, and the structure parameters are confirmed to be the optimum from the experiment results analysis. The measurement error of the system, established on these optimum structure parameters, is less than 0.1 mm in measurement range of 250 mm × 200 mm × 50 mm.

**Key words** information optics; 3D measurement; laser scanner; light-plane-equation; structure parameter; optimum design

## 1 引言

目前,逆向工程一般采用接触式三坐标探针扫描和非接触式结构光扫描<sup>[1,2]</sup>,这些扫描方法只能获取物体的单色三维信息,不易寻找物体的特征点、线、面,而这些特征点、线、面在三维逆向工程中起着关键的作用。而获取物体的彩色三维数据主要采用彩色编码法<sup>[3,4]</sup>。彩色编码对物体的颜色、亮度敏感,会影响所摄取的彩色线条的红绿蓝(R,G,B)值。所以,对每一种物体都需要颜色校准,一般用于

快速测量相同材料的物体,如人脸彩色三维数据,所以,这种彩色编码方法在实用中将会受到限制。基于单色三维测量的研究成果<sup>[5,6]</sup>,本文提出一种彩色三维激光扫描测量方法,即在单色三维激光扫描测量研究的基础上,使用贴图技术<sup>[7]</sup>,可获取空间物体表面三维数据和颜色信息(x,y,z,R,G,B)。彩色三维激光扫描测量技术可广泛应用于产品设计、模具制造、多媒体、游戏业、动画业、医学以及古文物的数字化等方面。

收稿日期:2002-05-24;收到修改稿日期:2002-07-08

作者简介:许智钦(1965—),男,台湾智泰科技有限公司总经理,博士,天津大学博士后,主要从事激光三维扫描系统的研究。E-mail:hakiem@3dfamily.com

\*联系作者,教授,天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室。主要研究方向为激光及光电测试技术。E-mail:sunck@tju.edu.cn

## 2 彩色三维激光扫描测量原理

在单色三维测量基础上,运用彩色信息摄取、彩色贴图以及坐标计算等技术,实现了彩色三维激光扫描测量<sup>[7]</sup>。测量系统主要由线结构激光光源、彩色 CCD 摄像机、马达控制可旋转的滤光镜、控制电路板和计算器组成,如图 1 所示。系统在测量过程中分两步对被测物体摄像。首先,关闭激光光源,打开滤光镜,用彩色 CCD 摄像机拍摄一幅被测物体的彩色照片,这样便记录下了物体的彩色信息,用于后续处理。然后,关闭滤光镜,这时 CCD 摄像机所摄取的是单色信息。打开激光光源,光平面和被测物体表面相交形成一条起伏变化的亮线。这条亮线成像在 CCD 摄像机的敏感面上,经光电转换成电信号后,由图像采集器采集并送入计算机。由光平面方程式原理测量出这条亮线上各点的三维数据。由步进电机带动线结构激光光源做步进转动,使光平面在物体表面上扫描,从而实现整个被测表面的三维测量。将所摄取的物体的颜色信息和所求取物体三维数据,采用贴图技术,将物体的颜色信息匹配到各个被测点的三维数据上,这样就得到物体的彩色三维信息。将物体各个曲面都测量完后,采用曲面拼接技术,便可得到整个被测物体的彩色三维信息。

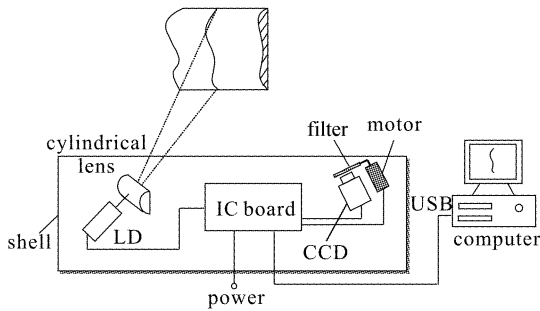


图 1 彩色三维激光扫描测量系统的工作原理图

Fig. 1 Principle of color 3D laser scanning measurement system

## 3 光平面方程三维测量模型

光平面方程三维测量模型用于建立计算机屏幕 2D 坐标和空间被测点三维坐标之间的转换关系,由摄像机透视变换模型和光平面方程测量模型两部分组成。

### 3.1 摄像机透视变换模型

摄像机的透视成像通常可以近似地看作是一个针孔成像,图 2 是摄像机透视变换示意图。图中  $o_c$  点为成像透视中心, $o_c z_c$  为摄像机成像透镜的光轴,

它与摄像机的像平面(CCD 的感光面)垂直, $O$  为光轴与像平面的交点,它是像平面的光学中心。 $O$  和  $o_c$  间的距离为  $f$ ,是摄像机的有效焦距。过  $O$  点作像平面坐标系  $O-XY$ ,其  $X$  轴沿 CCD 像素横向方向, $Y$  轴垂直于  $X$  轴,使  $O-XY$  成右手直角坐标系。过  $o_c$  点作摄像机坐标系  $o_c-x_c y_c z_c$ ,使  $x_c$  轴和  $y_c$  轴分别平行于  $X$  轴和  $Y$  轴。空间一点  $P(x_w, y_w, z_w)$  在像面上的成像点为  $P(X, Y)$ 。光学中心  $O$  点在计算机屏幕坐标系下的二维坐标为  $O(u_0, v_0)$ 。像点  $P(X, Y)$  在计算机屏幕坐标系下的坐标为  $P(u, v)$ 。物空间的三维坐标  $(x_w, y_w, z_w)$  和计算机屏幕二维坐标  $(u, v)$  的透视变换模型为<sup>[8]</sup>

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\lambda \neq 0$ , 为比例因子;

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}, m_{11}, m_{12}, \dots, m_{34} \text{ 为测量系统参数。}$$

式(1)是摄像机透视变换模型,它建立了计算机屏幕 2D 坐标和空间被测点三维坐标的转换关系,有 12 个参数:  $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{34}$ , 这些参数需要用摄像机标定求出<sup>[9]</sup>。

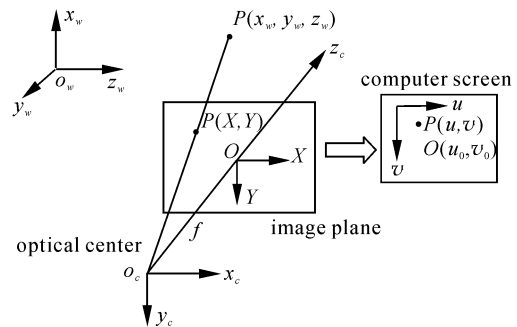


图 2 CCD 摄像机透视变换示意图

Fig. 2 Principle of CCD camera perspective transformations

### 3.2 光平面方程测量模型

在测量时,步进电机带动线结构激光光源转动,光平面在空间做扫描运动,在空间便有多多个光平面,每个光平面间隔角度为  $\phi$ ,如图 3 所示。若第  $k$  个光平面在物空间坐标系中的平面方程为

$$a_k x_w + b_k y_w + c_k z_w + d_k = 0 \quad (2)$$

联立方程(1)和(2),便可建立计算机屏幕坐标( $u, v$ )和每个光平面上被测点在测量坐标系下的三维坐标( $x_w, y_w, z_w$ )之间的关系

$$\begin{bmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ vm_{31} - m_{21} & vm_{32} - m_{22} & vm_{33} - m_{23} \\ a_k & b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} - um_{34} \\ m_{24} - vm_{34} \\ -d_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)是光平面方程测量模型。每个光平面的参数为  $a_k, b_k, c_k, d_k, k = 1, 2, \dots, n$  需由光平面方程式标定求出<sup>[10]</sup>。

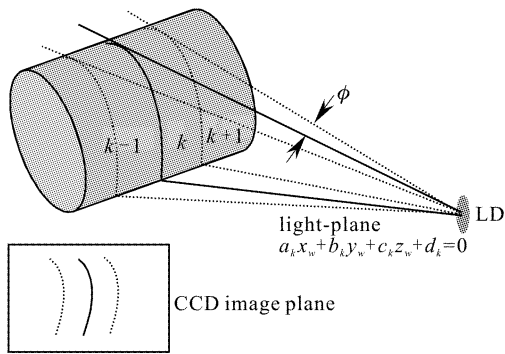


图3 光平面方程测量原理

Fig. 3 Measuring principle of light-plane-equation

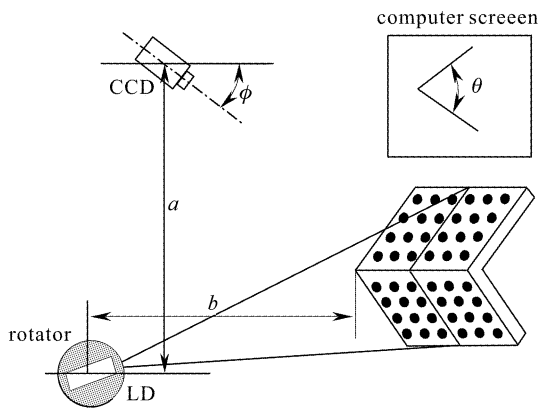


图4 测量系统结构图

Fig. 4 Structure of the measuring system

### 4 系统结构参数优化设计实验

非接触式激光扫描三维测量系统的基本结构如图4所示,系统主要由一支线结构光的半导体激光光源和一台彩色 CCD 摄像机构成,光源架在旋转盘上。首先要确认各组件的相对位置,设转盘中心到摄像机中心的距离为  $a$ ,转盘中心到被测物的距离为  $b$ ,摄像机光轴与水平线的夹角为  $\phi$ 。下面通过实

验来优化设计系统的结构参数  $a, b, \phi$ , 使系统达到最佳的工作状态。

在测量系统前摆放一个两面互相垂直的被测物体,线结构激光垂直投射在被测物体的两个正交平面上,由 CCD 摄像机采集图像并送到计算机屏幕上显示,显示的激光线条图像如图4所示。图像上的两条线有一固定夹角,令其为  $\theta$ 。利用激光线条之间的夹角  $\theta$  作为参考,调整各参数值会造成  $\theta$  值改变。调整参数  $a, b, \phi$  的值,实验测得的不同  $\theta$  值列于表1。

表1 每一组参数值和其对应的  $\theta$  值  
Table 1 Parameters and corresponding angle  $\theta$

Parameters			Angle
$a$ /mm	$b$ /mm	$\phi$ /( $^\circ$ )	$\theta$ /( $^\circ$ )
120	70	12	186
185	70	15	177
205	85	18	167
270	125	23	156
330	30	28	146
390	35	30	137
410	81	32	127
500	70	40	117
660	70	58	104

由表1可知,当  $a = 120$  mm,  $b = 70$  mm,  $\phi = 12^\circ$  时,CCD 摄像机的光轴几乎和被测物垂直,所以空间中两垂直的激光光线在 CCD 摄像机上所形成的夹角为  $186^\circ$ ,近似为一条直线。当  $a = 500$  mm,  $b = 70$  mm,  $\phi = 40^\circ$  时,空间中两垂直激光光线在 CCD 上形成  $117^\circ$  夹角的两直线。用表1中的各组结构参数来做实验,根据实验结果来决定何种结构参数的系统具有最高的测量精度。

用一平面度较高的平面物体 ( $250$  mm  $\times$   $200$  mm) 做被测物体,并设定起始所在的位置为  $0$ ,然后将被测面移动一定距离  $d$ ,如图5所示。每移动一次用实验系统测量出平面的位置数据,并将测量结果记录下来,用于分析测量误差值。图6是被测平面在不同位置时测量所得到的三维数据。

利用所测量到的数据,计算不同位置的回归平面,并求出它与  $0$  位平面的距离,利用所计算出的数据与已知数据比较,可得到系统的测量误差。图7是在不同  $\theta$  角时,被测平面移动距离  $d$  和测量误差  $\delta$  的关系曲线。由图可看出,当  $\theta = 117^\circ$  时测量误差  $\delta$  最小(小于  $0.1$  mm)。对照表1,系统结构的最佳参数确定为:  $a = 500$  mm,  $b = 70$  mm,  $\phi = 40^\circ$ 。

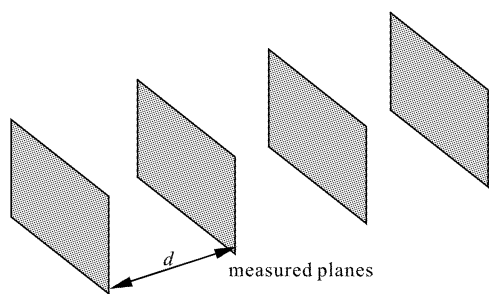
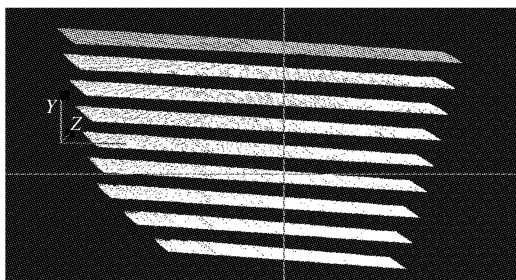
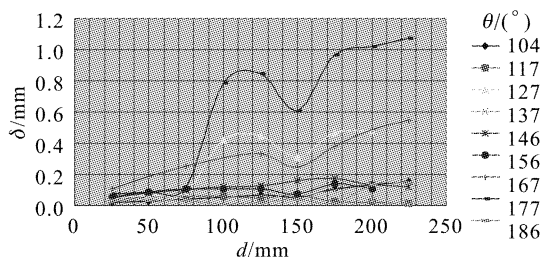
图 5 被测平面每次移动距离  $d$ Fig. 5 Movement of the measured planes at distance  $d$ 

图 6 被测平面移动多个位置的测量数据

Fig. 6 Measuring data of measured planes at different positions

图 7  $\theta$ 角不同时,被测平面移动距离  $d$  和测量误差的关系曲线Fig. 7 Relation curves between distance  $d$  and measuring error  $\delta$  at different angle  $\theta$ 

## 5 结 论

本文提出一种彩色三维激光扫描测量方法,即在单色三维激光扫描测量研究的基础上,运用彩色信息摄取、彩色贴图以及坐标计算等技术,可获取空间物体表面三维数据和颜色信息( $x, y, z, R, G, B$ )。

介绍了彩色三维激光扫描测量系统的工作原理,推导出空间三维坐标的光平面方程测量模型。提出了系统结构参数的优化设计方法,进行了优化实验,根据实验结果,确定了测量系统的最佳参数值。基于这些参数建造的测量系统,在  $250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  测量范围内,测量误差小于  $0.1 \text{ mm}$ 。彩色三维激光扫描测量技术可广泛应用于产品设计、模具制造、多媒体、游戏业、动画业、医学以及古文物的数字化等方面,具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 B. Bidanda, S. Motavalli, K. Harding. Reverse engineering: an evaluation of prospective non-contact technologies and applications in manufacturing systems [J]. *Computer Integrated Manufacturing*, 1991, **4**(3):145~156
- 2 P. K. Commean, K. E. Smith, G. Bhatla *et al.*. Geometric design of a multisensor structured light range digitizer [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(4):1349~1358
- 3 G. Häusler, D. Ritter. Parallel three-dimensional sensing by color-coded triangulation [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(35):7164~7169
- 4 Liu Weiyi, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Three-dimensional surface profilometry using color-coded projection grating [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6):687~690 (in Chinese)
- 5 K. C. Fan. A non-contact automatic measurement for free-form surface profile [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1997, **10**(4):277~285
- 6 Wen-Chih Tai, Ming Chang. Noncontact profilometric measurement of large-form parts [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(9):2730~2735
- 7 Xu Zhiqin, Sun Changku. Three-dimensional colorful reverse engineering [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(9):937~939 (in Chinese)
- 8 Sun Changku, Ye Shenghua. *Laser Measurement Technique* [M]. Tianjin: Publishing House of Tianjin University, 2001. 7 (in Chinese)
- 9 Changku Sun, Qiang You, Yu Qiu *et al.*. Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(11):2565~2571
- 10 Xu Zhiqin. Study of color 3D laser scanning system [D]. Doctoral dissertation, Tianjin University, 2002 (in Chinese)